



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015127140/28, 06.07.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
06.07.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 06.07.2015

(45) Опубликовано: 20.08.2016 Бюл. № 23

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: F. Simon, C. Soldner. Uniformity studies of scintillator tiles directly coupled to SiPMs for imaging calorimetry. 2010 p. 1-6. RU 2012121606 A, 28.05.2012. RU 76140 U1, 10.09.2008. US 20100200762 A1, 12.08.2010.

Адрес для переписки:

620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, УрФУ,
Центр интеллектуальной собственности, Марк
Т.В.

(72) Автор(ы):

Горбунов Максим Александрович (RU),
Громыко Максим Викторович (RU),
Дудин Сергей Владимирович (RU),
Игнатьев Олег Валентинович (RU),
Крымов Андрей Львович (RU),
Швалева Ольга Васильевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

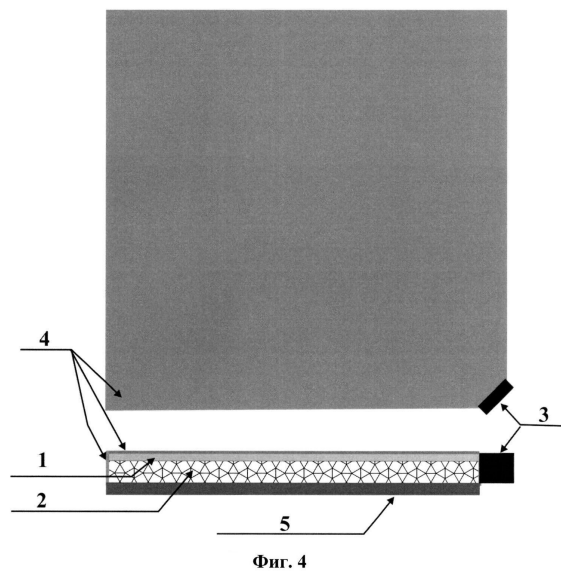
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования "Уральский
федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина" (RU),
Общество с ограниченной ответственностью
"Научно-производственная компания
"АТОМ Электроникс" (RU),
Общество с ограниченной ответственностью
"НЕОРадтех" (RU)

(54) ДЕТЕКТОР ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ С ТОНКИМ СЦИНТИЛЛЯТОРОМ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области детекторов заряженных частиц на основе твердотельных органических сцинтилляторов. Детектор заряженных частиц с тонким сцинтиллятором в виде пластины содержит полупроводниковый фотосенсор в качестве преобразователя инициированных заряженными частицами световых вспышек в электрические импульсы, при этом сколь угодно тонкая полностью отполированная пластина сцинтиллятора выполнена в виде равноугольного многоугольника с числом углов не менее четырех оптически и механически соединена с прозрачной для сцинтилляций полностью отполированной подложкой, имеющей форму и коэффициент преломления света такие же, как у сцинтиллятора, а суммарная толщина сэндвича, образованного

из сцинтиллятора и подложки, равна поперечнику чувствительной поверхности полупроводникового фотосенсора, оптически и механически присоединенного к сэндвичу в одном из его углов, который выполнен сточенным и отполированным для получения контактной площадки с размерами чувствительной области полупроводникового фотосенсора, при этом все поверхности сэндвича, кроме тыльной и с прикрепленным полупроводниковым фотосенсором, покрыты зеркальным отражателем, а тыльная поверхность покрыта диффузным отражателем. Технический результат - повышение эффективности сбора света на чувствительной поверхности фотосенсора. 1 з.п. ф-лы, 4 ил.



Фиг. 4



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**(21)(22) Application: **2015127140/28, 06.07.2015**(24) Effective date for property rights:
06.07.2015

Priority:

(22) Date of filing: **06.07.2015**(45) Date of publication: **20.08.2016** Bull. № 23

Mail address:

**620002, g. Ekaterinburg, ul. Mira, 19, UrFU, TSentr
intelektualnoj sobstvennosti, Marks T.V.**

(72) Inventor(s):

**Gorbunov Maksim Aleksandrovich (RU),
Gromyko Maksim Viktorovich (RU),
Dudin Sergej Vladimirovich (RU),
Ignatev Oleg Valentinovich (RU),
Krymov Andrej Lvovich (RU),
SHvaleva Olga Vasilevna (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Federalnoe gosudarstvennoe avtonomnoe
obrazovatelnoe uchrezhdenie vysshego
professionalnogo obrazovaniya "Uralskij
federalnyj universitet imeni pervogo Prezidenta
Rossii B.N. Eltsina" (RU),
Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennostyu
"Nauchno-proizvodstvennaya kompaniya
"ATOM Elektroniks" (RU),
Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennostyu
"NEORadtekh" (RU)**

(54) **DETECTOR OF CHARGED PARTICLES WITH THIN SCINTILLATOR**

(57) Abstract:

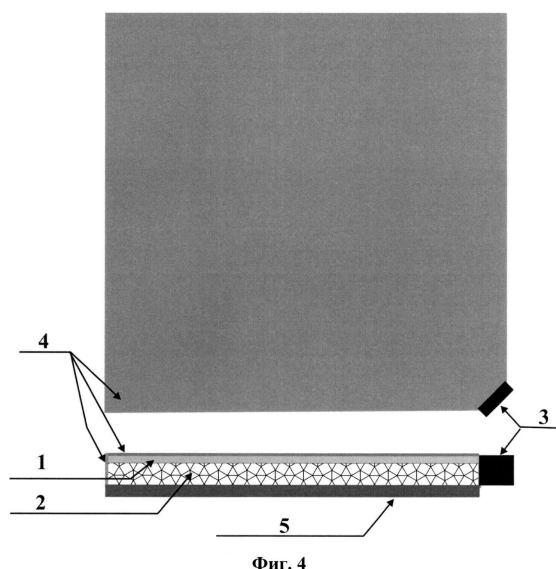
FIELD: physics.

SUBSTANCE: invention relates to detectors of charged particles based on solid-state organic scintillators. Detector of charged particles with a thin scintillator in the form of a plate contains semiconducting photosensor as a converter of the light flashes initiated by charged particles into electric pulses, where arbitrarily thin and completely polished scintillator plate made in the form of equilateral polygon with at least four angles is optically and mechanically connected to the transparent for scintillations and completely polished substrate of the same shape and light refraction coefficient as that of scintillator, and total thickness of sandwich formed by the scintillator and the substrate equals to the size across sensitive surface of the semiconducting photosensor optically and mechanically connected to the sandwich in one of its angles which is grind down and polished to obtain a contact pad with dimensions of sensitive area of semiconducting photosensor, all sandwich surfaces except the rear and with attached semiconducting photosensor, coated with a mirror reflector, and the rear

surface is coated with diffusing reflector.

EFFECT: technical result is higher efficiency of light collecting on the sensitive surface of the photosensor.

1 cl, 4 dwg



Настоящее изобретение относится к области сцинтилляционных детекторов ионизирующих излучений, точнее к детекторам заряженных частиц на основе твердотельных органических сцинтилляторов.

Твердотельные органические (кристаллические и пластиковые) сцинтилляторы обладают рядом свойств, делающих их основным рабочим веществом α - и β -детекторов:

1) низкий эффективный атомный номер обуславливает минимальное обратное рассеяние заряженных частиц и минимальные их радиационные потери (тормозное излучение); благодаря этому аппаратурный (измеренный) энергетический спектр минимально отличается от физического - почти вся энергия частиц расходуется на ионизацию вещества пластика и, соответственно, на конверсию в световые импульсы;

2) сцинтиллятор может быть изготовлен достаточно тонким для нечувствительности к гамма-излучению при сохранении высокой эффективности детектирования α - и β -частиц - таким образом можно отдельно измерять α -, β -, и γ -излучение в смешанных радиационных полях;

3) пластиковые сцинтилляторы легко поддаются механической обработке, и в процессе изготовления им могут быть приданы достаточно произвольные формы и размеры.

Для преобразования инициированных заряженными частицами сцинтилляционных вспышек в электрические сигналы требуется фотосенсор. До недавнего времени безальтернативным фотосенсором был вакуумный фотоумножитель (Photomultiplier Tube - PMT). Главная проблема съема света с тонкого пластикового сцинтиллятора большой площади с помощью PMT - несоответствие размеров фотокатода и сцинтиллятора, приводящее к потерям части фотонов сцинтилляционных вспышек и, как следствие, к уменьшению амплитуд электрических сигналов на аноде PMT.

Известно несколько приемов для снятия этого противоречия. Большинство из них подробно описаны в монографии [Акимов Ю.К. Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2014 г., 323 с.]:

- сочленение тонкой сцинтилляционной пластины с фотокатодом PMT с помощью световода из хорошо отполированного оргстекла или стекловолокна в виде рыбьего хвоста (фиг. 1);

- тоже самое, но световод в виде веера;

- применение волоконной оптики (пучок световодов окружает сцинтилляционную пластину по периметру или проложен в специальной канавке в виде змейки по лицевой и/или тыльной поверхности сцинтилляционной пластины).

Существуют и иные, более сложные решения. Общий их недостаток состоит в больших потерях света и, следовательно, в увеличении нижнего предела энергий регистрируемых β -частиц, громоздкости и сложности конструкции детектора (обычно стоимость световода превышает стоимость сцинтиллятора, с которым он применяется). Применение α - и β -детекторов в технологических установках атомной промышленности и атомных электростанций (в т.ч. для контроля поверхностной загрязненности оборудования и персонала) требует высокой степени устойчивости к механическим и электромагнитным воздействиям. Понятно, как трудно удовлетворить этим требованиям с детекторами, содержащими вакуумные PMT и хрупкие световоды.

Целый ряд проблем создания α - и β -детекторов для применения в атомной промышленности снимается при замене вакуумных PMT на кремниевые фотосенсоры [Акимов Ю.К. Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2014 г., 323 с.]. К числу их относятся: кремниевые фотодиоды (PhD), кремниевые дрейфовые детекторы (SDD), лавинные фотодиоды (APD) и кремниевые фотоумножители (SiPM). В двух последних случаях кремниевые фотосенсоры обладают внутренним усилением.

Для APD усиление составляет величину $50 \div 200$ (в зависимости от режимов эксплуатации), а для SiPM усиление может быть на уровне усиления вакуумных фотоумножителей. SiPM наиболее привлекательны в качестве фотосенсора для применения со сцинтилляторами. SiPM представляют собой кремниевые сэндвичи - слои, образующие рп-переходы, на которые подано обратное смещение. Размеры чувствительной к свету поверхности от 1×1 до 6×6 mm. Толщина сэндвича ≈ 5 μ m. Каждый такой сэндвич содержит в себе несколько тысяч микропикселей - миниатюрных счетчиков Гейгера-Мюллера с гасящими разряд резисторами. Размер одного микропикселя от 10×10 до 50×50 μ m. Фотон света, с вероятностью $40 \div 70\%$ (отношение чувствительной и общей площадей фотосенсора - FF) попавший на микропиксель с вероятностью $25 \div 75\%$ (квантовая эффективность - QE) вызывает появление электрон-дырочной пары. Далее, с вероятностью $70 \div 90\%$ (P_G), двигаясь в электрическом поле с высокой напряженностью, фотоэлектрон рождает лавину электронов с числом носителей $10^5 \div 10^6$ (это вполне соответствует усилению вакуумных фотоумножителей). Величина, равная $FF \times QE \times P_G$, называется фотодетекторной эффективностью кремниевого фотоумножителя (PDE). PDE для SiPM имеет тот же смысл, что QE для PMT. Процесс образования лавины занимает около 1 ns. Возникающий лавинный ток, как и в счетчике Гейгера-Мюллера, протекает через гасящий резистор, напряжение падает, и лавинный процесс прекращается. На нагрузке образуется сигнал стандартной амплитуды. Линейная зависимость между засветкой SiPM, сцинтилляционной вспышкой и величиной выходного тока достигается за счет большого числа микропикселей, подключенных к общей нагрузке, но при условии, что число фотонов света во вспышке существенно ниже, чем число микропикселей.

Целый ряд преимуществ кремниевых фотоумножителей перед вакуумными фотоумножителями (PMT) делают их очень перспективными для создания сцинтилляционных детекторов ионизирующих излучений. Это нечувствительность к магнитному полю; малые габариты и масса; низкое значение рабочего напряжения ($25 \div 75$ V против $1000 \div 2000$ V, необходимых для PMT); более широкий, чем для PMT, спектральный диапазон чувствительности к свету (от фиолетового до оранжевого).

Известны детекторы заряженных частиц, где в качестве конвертора световых вспышек в тонком пластиковом сцинтилляторе в электрические импульсы применяются кремниевые фотоумножители. В подавляющем большинстве для этого используются световоды (простые или спектросмещающие), уложенные в специальные канавки в виде змейки на тыльной стороне сцинтилляционной пластины (фиг. 2) [V. Andreev et al. A high-granularity scintillator calorimeter readout with silicon photomultipliers. Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research, V. A540 (2005) p. 368-380], [M.Y. Kim et al. Beam test performance of SiPM-based detectors for cosmic-ray experiments. Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research, V. A703 (2013) p. 177-182], [P. Buzhan et al. Silicon photomultiplier and its possible applications. Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research V. A504 (2003) p. 48-52]. Недостатком таких детекторов являются:

- сложность, а следовательно и дороговизна конструкции;
- значительные потери света на границах «сцинтиллятор-световод-SiPM» и в самом световоде из-за большой его длины.

Возможен съем световых вспышек на SiPM без применения световодов, но для обеспечения слабой зависимости амплитуды электрического сигнала от места взаимодействия заряженной частицы со сцинтиллятором необходимо большое число SiPM, установленных с тыльной стороны тонкой сцинтилляционной пластины. Это

неприемлемо по экономическим соображениям.

Известен сцинтилляционный детектор [F. Simon, C. Soldner. Uniformity studies of scintillator tiles directly coupled to SiPMs for imaging calorimetry. Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research V. A620 (2010) p. 196-201] заряженных частиц с одним SiPM, находящимся в оптическом контакте со сцинтилляционной пластиной (является прототипом). Детектор представляет собой (фиг. 3) пластину сцинтиллятора размером 30×30×5 mm, в боковой грани которой сделана полость для размещения в ней кремниевого фотоумножителя размером 1×1 mm. Все стенки полости кроме одной, к которой примыкает SiPM, выполнены шероховатыми для получения диффузного рассеяния света, а соприкасающаяся с фотосенсором отполирована. Вся сцинтилляционная пластина обернута в алюминиевую фольгу для получения зеркального отражения света. Пластина сканировалась с шагом 0,5 mm коллимированным пучком β -частиц и для каждой позиции пучка измерялась средняя амплитуда электрических импульсов на выходе SiPM.

Достигнутая максимальная неоднородность светосбора в зависимости от места взаимодействия β -частиц со сцинтилляционным пластиком составила 35%. Неоднородность светосбора не превышала 20% в 98,9% позиций пучка, 10% - в 97,1% позиций, 5% - в 87,9% позиций.

Для сравнения были проведены измерения с SiPM просто приклеенным к боковой поверхности (без помещения в полость). Неоднородность светосбора не превысила 20% в 90,7% позиций пучка, 10% - в 80,85 позиций, 5% - в 57,4% позиций. Таким образом показано, что размещение фотосенсора в полости с диффузно отражающими стенками снижает зависимость амплитуды электрического сигнала на выходе SiPM от места взаимодействия β -частиц со сцинтилляционной пластиной.

Был исследован детектор с пластиной толщиной 3 mm. SiPM был помещен в аналогичную полость. Уменьшение толщины сцинтилляционного пластика привело к увеличению неоднородности светосбора: неоднородность светосбора не превысила 20% в 98,0% позиций пучка, 10% - в 94,0 позиций, 5% - в 82,5% позиций. Совершенно очевидно, что дальнейшее уменьшение толщины сцинтиллятора приведет к еще большему возрастанию неоднородности светосбора.

Недостатками детектора-прототипа являются следующие:

1. При такой конструкции невозможно применение тонкого пластического сцинтиллятора толщиной 1 mm и менее, что актуально для достижения нечувствительности детектора к гамма-фону.

2. Пластический сцинтиллятор в виде тонкой пластины, в которой сделана полость для помещения в нее SiPM, и при этом боковые поверхности ее шероховатые, а фронтальная - полированная, достаточно трудоемок в изготовлении и нетехнологичен.

Задачей изобретения является создание нечувствительного к гамма-излучению высокоэффективного детектора короткопробежных заряженных частиц с высокой однородностью светосбора по чувствительной поверхности.

Указанная задача решается тем, что рабочее вещество детектора представляет собой сэндвич из сколь угодно тонкой сцинтиллирующей пластиковой пластины и оптически прозрачной в полосе высвечивания пластика подложки с общей толщиной, равной поперечнику чувствительной области кремниевого фотоумножителя, который оптически и механически сочленяется с контактной площадкой сэндвича, имеющей площадь равную площади кремниевого фотоумножителя и созданной на месте одного из углов сэндвича с рабочей и тыльной сторонами в виде равностороннего многоугольника с числом сторон от четырех до бесконечности, при этом все свободные поверхности сэндвича, кроме тыльной, покрыты зеркальным отражателем, а тыльная сторона -

диффузным.

Реализация детектора показана на фиг. 4, где приведена одна из возможных конструкций. Она содержит детектирующую среду в виде сэндвича из сколь угодно тонкого сцинтиллирующего пластика 1 и нанесенного на его тыльную сторону по всей ее площади оптически прозрачного в полосе высвечивания пластика несцинтиллирующего материала 2, например специально подобранного оргстекла, имеющего коэффициент преломления, равный коэффициенту преломления сцинтиллятора. Толщина образованного из сцинтилляционной пластины и несцинтиллирующего, оптически прозрачного материала сэндвича выбирается равной поперечнику чувствительной поверхности кремниевого фотоумножителя 3. Детектирующий сэндвич имеет форму равностороннего многоугольника с числом сторон не менее 4-х (вплоть до окружности). Один угол сэндвича сточен до получения площадки с размерами, равными размерам чувствительной области SiPM. Площадка отполирована и с ней оптически и механически сопряжен кремниевый фотоумножитель 3. Все свободные поверхности сэндвича, кроме тыльной (со стороны несцинтиллирующего пластика), покрыты зеркальным отражателем 4, а упомянутая тыльная поверхность покрыта диффузным отражателем 5.

Создание такой конструкции продиктовано стремлением одинаково хорошо собирать на небольшой относительно поверхности пластика чувствительной поверхности кремниевого фотоумножителя световые вспышки, возникающие в любой точке сцинтиллятора.

Прозрачная несцинтиллирующая подложка под пластиком в сэндвиче призвана задействовать всю чувствительную поверхность кремниевого фотосенсора в сборе света.

Известно [Акимов Ю.К. Фотонные методы регистрации излучений. Дубна: ОИЯИ, 2014 г., 323 с.], что при форме сцинтиллятора, сильно отличающейся от куба, наилучшие условия для сбора света на одной из граней сцинтиллятора создаются при наличии зеркального отражателя вокруг кристалла. Однако могут возникать ситуации, когда некоторые фотоны света, претерпевая множество отражений, могут до своего поглощения в сцинтилляторе так и не достигнуть фотосенсора. Диффузный отражатель способствует исключению движения фотонов света по одному и тому же пути и тем самым повышает вероятность попадания на фотосенсор до своего поглощения.

Размещение кремниевого фотоумножителя именно в одном из углов сэндвича, а не на одной из граней, также увеличивает эффективность светосбора, поскольку этим минимизируется число граней детектирующей среды, перпендикулярных чувствительной поверхности фотосенсора. Это согласно следствиям закона Ламберта условие максимального светосбора [V.P. Semynozhenko et al. Recent progress in the development of CsI(Tl) crystal-Si-photodiode spectrometric detection assemblies. Nucl. Instrum. and Meth. in Physics Research V. A 537 (2005) p. 383-388].

Увеличение числа боковых сторон детектирующего сэндвича также способствует улучшению светосбора.

Принятые меры при прочих равных условиях обеспечивают гораздо более эффективный светосбор, чем в детекторе-прототипе.

Технический результат применения заявляемого детектора заряженных частиц с тонким сцинтиллятором состоит в том, что появляется возможность эффективного сбора света со сколь угодно тонких сцинтилляционных пластиковых пластин, имеющих площадь рабочей поверхности, многократно превышающую площадь чувствительной поверхности кремниевого фотоумножителя, и тем самым обеспечить низкий

энергетических порог регистрации короткопробежных заряженных частиц.

Формула изобретения

1. Детектор заряженных частиц с тонким сцинтиллятором в виде пластины,
5 содержащий полупроводниковый фотосенсор в качестве преобразователя
инициированных заряженными частицами световых вспышек в электрические импульсы,
отличающийся тем, что сколь угодно тонкая полностью отполированная пластина
сцинтиллятора выполнена в виде равностороннего многоугольника с числом углов не
10 менее четырех оптически и механически соединена с прозрачной для сцинтилляций
полностью отполированной подложкой, имеющей форму и коэффициент преломления
света такие же, как у сцинтиллятора, а суммарная толщина сэндвича, образованного
из сцинтиллятора и подложки, равна поперечнику чувствительной поверхности
полупроводникового фотосенсора, оптически и механически присоединенного к
15 сэндвичу в одном из его углов, который выполнен сточенным и отполированным для
получения контактной площадки с размерами чувствительной области
полупроводникового фотосенсора, при этом все поверхности сэндвича, кроме тыльной
и с прикрепленным полупроводниковым фотосенсором, покрыты зеркальным
отражателем, а тыльная поверхность покрыта диффузным отражателем.

2. Детектор по п. 1, отличающийся тем, что в качестве полупроводникового
20 фотосенсора применен кремниевый фотоумножитель.

25

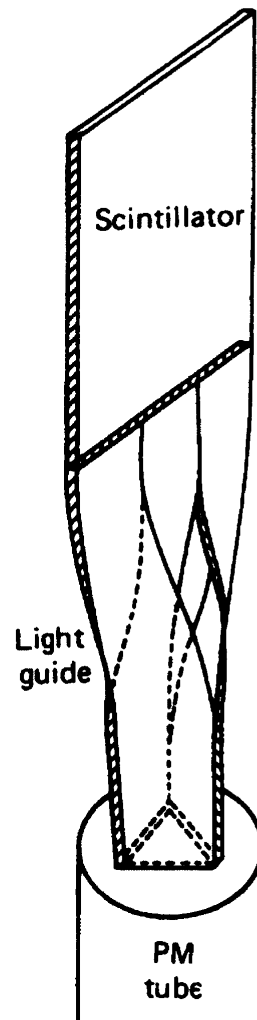
30

35

40

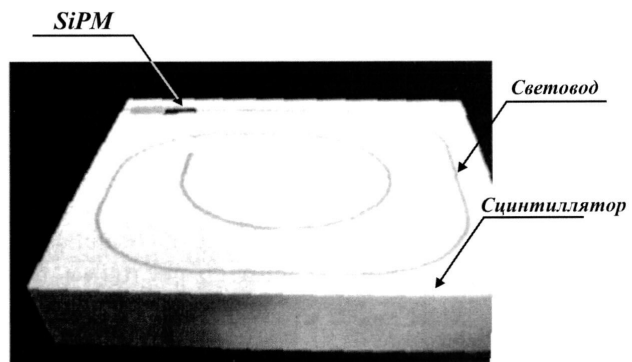
45

Детектор заряженных частиц
с тонким сцинтиллятором



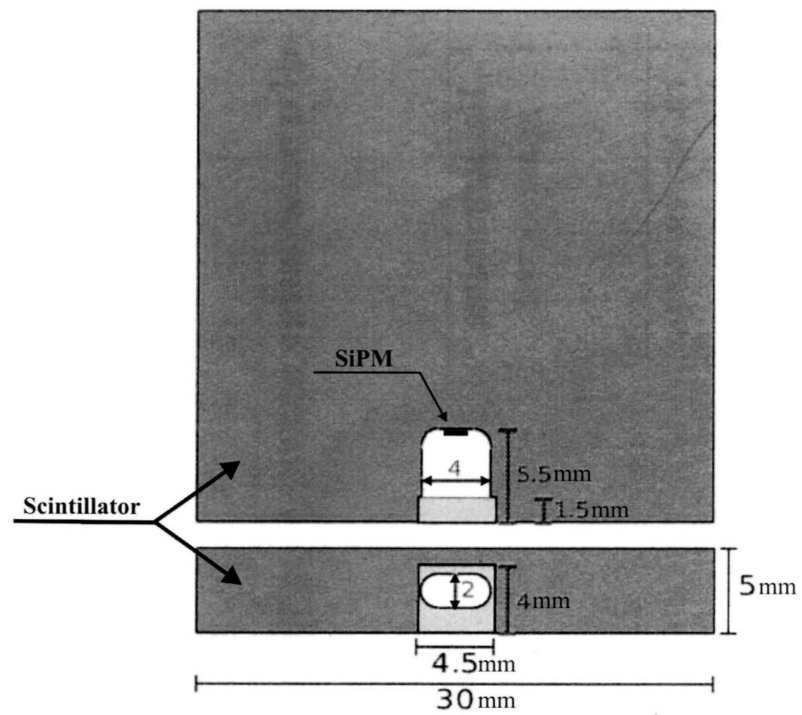
Фиг. 1

Детектор заряженных частиц
с тонким сцинтиллятором



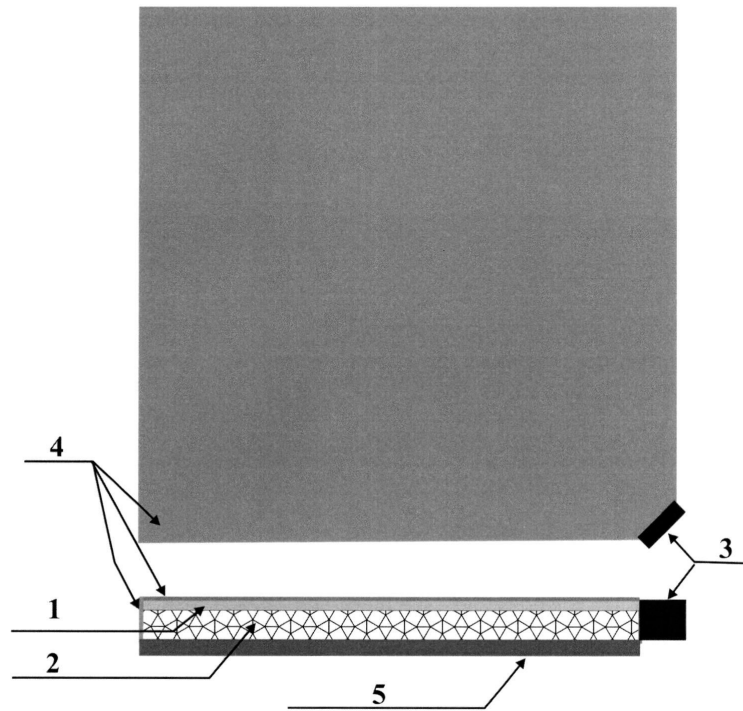
Фиг. 2

Детектор заряженных частиц
с тонким сцинтиллятором



Фиг. 3

Детектор заряженных частиц
с тонким сцинтиллятором



Фиг. 4